

[First Hit](#)[Previous Doc](#)[Next Doc](#)[Go to Doc#](#)[Generate Collection](#)[Print](#)

L2: Entry 3 of 6

File: JPAB

Apr 7, 1995

PUB-NO: JP407091948A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 07091948 A

TITLE: NON-CONTACT TYPE FILM THICKNESS MEASURING APPARATUS

PUBN-DATE: April 7, 1995

## INVENTOR-INFORMATION:

NAME

COUNTRY

MATSUBARA, HIROYUKI

WADA, TAKASHI

MATSUDA, MORIHIRO

## ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME

COUNTRY

TOYOTA CENTRAL RES &amp; DEV LAB INC

APPL-NO: JP05261810

APPL-DATE: September 24, 1993

INT-CL (IPC): G01 B 21/08; G01 B 11/06

## ABSTRACT:

PURPOSE: To provide a non-contact type film thickness measuring apparatus which enables measurement at a high accuracy.

CONSTITUTION: It is so constituted to contain an eddy current sensor probe and an optical type sensor probe 14 both housed in a probe case and a signal processing section which determines a distance between a base body 100 and a film 110 based on outputs from the probes. The optical type sensor probe 14 is made up of a projection part 26 and a photodetecting part 28. The projection part 26 contains a laser diode (LD) 30, lenses 32 and 36 and an optical fiber 34. Light emitted from the LD30 propagates through the optical fiber 34 by way of the lens 32 and reaches the surface of the film 110 through the lens 36. A specified proper mode alone is selected when the light propagates through the optical fiber 34 and the center position of the intensity distribution thereof at the emission end coincides with that of the optical fiber 34 thereby making it possible to prevent changes in the position of the emission light.

COPYRIGHT: (C)1995, JPO

[Previous Doc](#)[Next Doc](#)[Go to Doc#](#)

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平7-91948

(43)公開日 平成7年(1995)4月7日

(51)Int.Cl.<sup>6</sup>

G 0 1 B 21/08  
11/06

識別記号

序内整理番号

F I

技術表示箇所

Z

審査請求 未請求 請求項の数5 FD (全12頁)

(21)出願番号

特願平5-261810

(22)出願日

平成5年(1993)9月24日

(71)出願人 000003609

株式会社豊田中央研究所

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1

(72)発明者 松原 弘幸

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内

(72)発明者 和田 隆志

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内

(72)発明者 松田 守弘

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内

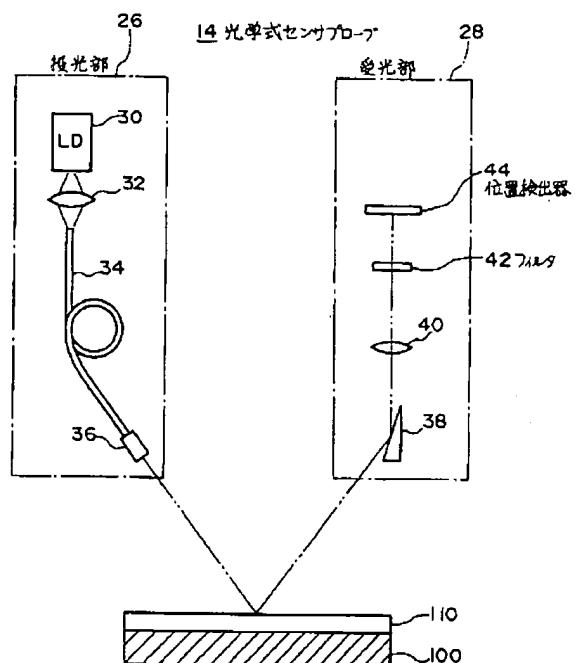
(74)代理人 弁理士 布施 行夫 (外2名)

(54)【発明の名称】 非接触式膜厚測定器

(57)【要約】

【目的】 高い精度で測定することができる非接触式膜厚測定器を提供すること。

【構成】 この非接触式膜厚測定器は、プローブケース内に収納された渦電流センサプローブ及び光学式センサプローブ14と、各プローブからの出力に基づき基体100および被膜110までの距離を求める信号処理部を含んで構成される。光学式センサプローブ14は、投光部26と受光部28とからなる。投光部26は、レーザダイオード(LD)30、レンズ32、36、光ファイバ34を含んでいる。LD30からの出射光は、レンズ32を介して光ファイバ34内を伝搬し、レンズ36を介して被膜110表面に到達する。光は、光ファイバ34を伝搬する際に所定の固有モードのみが選択され、また出射端での強度分布の中心位置は光ファイバ34の中心位置に一致するため、出射光の位置変動が防止される。



1

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 投光部と受光部とを含んでおり、導体上の絶縁物表面における光の反射を利用して前記絶縁物表面までの距離を測定する光学式センサと、前記導体に発生する渦電流を利用して前記導体までの距離を測定する渦電流センサと、前記光学式センサによって測定される距離と前記渦電流センサとによって測定される距離との差から前記絶縁物の膜厚を算出する膜厚算出手段とを備える非接触式膜厚測定器において、

前記光学式センサの投光部は、

前記絶縁物に対して光を照射するレーザ光源と、

前記レーザ光源から入射された光の中の所定の導波モードの光のみを通過させ、前記絶縁物表面に向け出射する光ファイバと、

を含むことを特徴とする非接触式膜厚測定器。

【請求項2】 導体上の絶縁物表面における光の反射を利用して前記絶縁物表面までの距離を測定する光学式センサと、

前記導体に発生する渦電流を利用して前記導体までの距離を測定する渦電流センサと、

前記渦電流センサの温度を検出する温度センサと、

前記渦電流センサを加熱するヒータと

前記温度センサによって検出される前記渦電流センサの温度を前記ヒータによる加熱を行うことにより一定に維持する温度制御手段と、

前記光学式センサによって測定される距離と前記渦電流センサとによって測定される距離との差から前記絶縁物の膜厚を算出する膜厚算出手段と、

を備え、前記渦電流センサの温度を制御して温度ドリフトを防止しながら、前記絶縁物の膜厚測定を行うことを特徴とする非接触式膜厚測定器。

【請求項3】 請求項2において、

前記温度制御手段による前記渦電流センサの温度調整は、前記ヒータに対する通電を断続することにより行い、

前記渦電流センサによる距離の測定は、前記ヒータに対する通電が中断したときに行うことを行なうことを特徴とする非接触式膜厚測定器。

【請求項4】 導体上の絶縁物表面における光の反射を利用して前記絶縁物表面までの距離を測定する光学式センサと、

前記導体に発生する渦電流を利用して前記導体までの距離を測定する渦電流センサと、

前記渦電流センサの温度を検出する温度センサと、

前記渦電流センサを加熱するヒータと

前記温度センサによって検出される前記渦電流センサの温度を、前記ヒータに交流電流を流して加熱することにより一定に維持する温度制御手段と、

前記渦電流センサの出力に現れる前記ヒータの電流周波

2

数成分を除去する周波数成分除去手段と、前記光学式センサによって測定される距離と、前記周波数成分除去手段によってヒータ電流の周波数成分が除去された前記渦電流センサの出力に基づいて測定される距離との差から前記絶縁物の膜厚を算出する膜厚算出手段と、

を備え、前記渦電流センサの温度を制御することにより温度ドリフトを防止することを特徴とする非接触式膜厚測定器。

10 【請求項5】 請求項2～4のいずれかにおいて、前記ヒータは、発熱用導体を1箇所あるいは複数箇所で折り返すことにより、あるいは偶数本の発熱用導体を組み合わせて用いることにより、隣接する前記発熱用導体を通電電流の向きが反対になるように配置して用いることを特徴とする非接触式膜厚測定器。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、導電体上に被覆された絶縁物の厚さを測定する非接触式膜厚測定器に関する。

## 【0002】

【従来の技術】従来より、導電性基体、例えば金属基体上に被覆された絶縁性被膜の膜厚を正確に測定するための種々の技術が公知であり、特に非接触式に膜厚測定を行なう装置として、特開平1-136009号公報に開示された「非接触式膜厚測定器」や特開平1-143908号公報に開示された「薄膜厚測定器」が知られている。

【0003】上述した2つの公報に開示された各膜厚測定器は、いずれも基本原理は同じであり、導電性基体までの距離を基体上に発生する渦電流を利用することにより電磁式センサで測定するとともに、絶縁性被膜までの距離を投光部と受光部とを有する光学式センサで測定する。そして、これらの各測定値の差から膜厚を求める。

【0004】これらの膜厚測定器を用いることにより、測定対象物に触れることなく、しかも測定対象物を破壊することなく膜厚測定を行うことができるというものである。

## 【0005】

【発明が解決しようとする課題】ところで、上述した非接触式膜厚測定器および薄膜厚測定器のそれぞれは、概して測定精度が低く、高精度な非接触測定が行えないという問題があった。そのため、被測定膜厚が厚い場合や低い測定精度でも充分な場合に限り使用されていた。従って、例えば自動車の塗装工程においてその塗装膜厚を測定するような場合には、1 μm程度の測定精度が必要であり、上述した従来の膜厚測定器では対応できなかつた。

【0006】上述した従来の膜厚測定器における測定精度が低い主な理由は、電磁式センサと光学式センサという2種のセンサの動作原理、機能、性能が異なるため

に、測定範囲、測定距離、分解能・精度などが大きく異なっていることがある。このため、膜厚測定器全体の精度は、低い性能を有するセンサの精度により制限されることになる。

【0007】例えば、光学式センサとして三角測量式のものが周知でありよく用いられるが、被測定物である絶縁物までの距離、つまりその表面までの距離を正確に測定するには、照射されたレーザ光のうち表面反射するレーザ光のみを選択的に受光するタイプ（以下、このように投光系と受光系が被測定面の法線に対し対称の角度で配置されていている正反射光学系にあるものを「正反射タイプ」という。）の光学式センサである必要がある。ところが、一般的に用いられている光学式センサのほとんどはこのタイプではなく、絶縁物表面の法線上に投光系を配置し、この法線と一定の角度を有する方向に受光系を配置している。このため、絶縁物の表面下に潜り込んだビームスポットを受光・検出しておらず、表面までの距離を正確に測定していないため、測定精度が低くなっていた。

【0008】また、上述した正反射タイプの光学式センサであっても、被測定物表面までの距離を高精度に測定するには重大な問題がある。すなわち、光学式センサに用いられるレーザからのビーム光の出射方向が変動することにより、被測定物表面上に照射されるスポット位置が変動し、これにより出力変動つまり測定距離のばらつきが生じていた。このことは、サブミクロン以下の分解能が要求される高精度な測定を行う場合になって初めて無視できない問題となって明らかになったものであり、それ以前は問題点という認識すら無かったことである。

【0009】一方、電磁式センサの一つである渦電流センサでは、センサの先端が測定範囲の基準点となっておりこの基準点における電磁場の状態を検出している。従って、非接触式で使う場合には被測定物である絶縁物及び導電体から離さなければならず、どうしても測定範囲が大きくなってしまう。このことは、センサ出力のS/N比を低減させ、測定分解能及び測定精度の低下を引き起こす。

【0010】非接触式の渦電流センサに関するこれらの欠点を改善する方法としては、ノイズを徹底的に排除するとともに測定距離と出力の関係を厳密に把握することも考えられる。しかし、 $1 \mu m$ 以下の測定精度を有し、実用に耐えうる高精度な膜厚測定を実現するためには、このような対策をもってしても十分でないことが明らかになった。

【0011】以上より、従来の膜厚測定器では、塗装直後のウェット膜厚等を再現性良く、しかも高精度に測定することができず、このような測定が可能な非接触式かつ非破壊式の膜厚測定器が望まれていた。

【0012】本発明は、このような従来の課題に鑑みなされたものであり、高い精度で測定することができる非

接触式膜厚測定器を提供することを目的とする。

【0013】

【課題を解決するための手段および作用】

第1発明

【構成】上述した課題を解決するために、請求項1の発明は、投光部と受光部とを含んでおり、導体上の絶縁物表面における光の反射を利用して前記絶縁物表面までの距離を測定する光学式センサと、前記導体に発生する渦電流を利用して前記導体までの距離を測定する渦電流センサと、前記光学式センサによって測定される距離と前記渦電流センサとによって測定される距離との差から前記絶縁物の膜厚を算出する膜厚算出手段とを備える非接触式膜厚測定器において、前記光学式センサの投光部は、前記絶縁物に対して光を照射するレーザ光源と、前記レーザ光源から入射された光の中の所定の固有モードの光のみを通過させ、前記絶縁物表面に向け出射する光ファイバと、を含むことを特徴とする。

【0014】上述した構成を有する請求項1に係る非接触式膜厚測定器は、従来の膜厚測定器がレーザからのビーム光の出射方向が変動することにより、被測定物表面上に照射されるスポット位置が変動して測定距離のばらつきが生じていた点に着目し、この点を改善したものである。

【0015】すなわち、レーザから出射するビーム光の変動そのものを無くすことは原理的に不可能であるため、結局、投光系の出射端からのビーム光の位置変動を制御するようにしたものである。具体的には、通常は光通信などで光を伝達するために用いられている光ファイバを利用し、その幾何学的構造に起因する光の閉じ込め作用により所定の固有モード（導波モード）の光のみを通過させることによって、出射ビーム光の位置変動を低減し、これにより測定精度を上げようというものである。

【0016】上述した構成において、光ファイバは、シングルモード光ファイバを用いることが望ましく、その長さは例えば数100mm程度とすることができる。

【0017】また、膜厚算出手段は、最も簡単な場合には、導体までの距離から絶縁物までの距離を減算することにより、絶縁物の膜厚を求めることができる。

【作用】請求項1の発明は以上の構成からなり、次に、その作用を説明する。

【0018】光学式センサの投光部において、レーザ光源から光を照射すると、この照射された光は光ファイバを通った後絶縁物に向けて一定の入射角 $\theta$ をなすように出射される。

【0019】例えば、光ファイバの一方端である入射端近傍にマイクロレンズからなる投光レンズを設け、他方端である出射端近傍に同様にマイクロレンズからなる受光レンズを設ける。これにより、レーザ光源から照射された光が投光レンズによりほぼ一定に集光されて光ファ

イバの入射端に入射され、光ファイバ内を伝送された後に光ファイバの出射端から出射される。さらに、出射された光が受光レンズによって平行ビームとなって絶縁物表面に入射角 $\theta$ で照射され、ごく狭い範囲のスポットを形成する。

【0020】このスポット部分で反射された光は、その後受光部に入射され、受光部内の位置検出器上に結像が生じる。このようにして生じた結像の位置に基づいて、三角測量の原理により絶縁物までの距離が求められる。

【0021】特に、上述した投光部に所定の固有モードのみの光を通過させるシングルモードの光ファイバを用いることにより、ある固有モード以外の光は伝送される途中において減衰し、所定の固有モードの光のみが通過してその出射端から絶縁物に向けて照射されることになる。このため、出射光の重心位置が光ファイバの中心に一致するため出射方向が安定し、絶縁物上に生じる照射スポットの光量重心も安定し、受光部内の位置検出器上に結像するスポット重心も安定することになり、この像に基づいて絶縁物表面までの距離が求められる。

【0022】一方、渦電流センサを用いることにより、導体上に発生する渦電流を利用して導体表面までの距離が求められる。

【0023】膜厚算出手段は、このようにして求めた2つの距離に基づいて、最も簡単な場合には、導体までの距離から絶縁物までの距離を減算することにより、絶縁物の膜厚を算出する。

【発明の効果】以上説明したように、請求項1の発明によれば、投光部に所定の固有モードの光のみを通過させる光ファイバを含み、レーザ光源から照射した光をこの光ファイバ内を通して後に絶縁物に向け出射させることにより、この出射光の出射方向の変動を防止して、正確に絶縁物表面までの距離を測定することができる。従って、この正確な絶縁物表面までの距離に基づいて、絶縁物の膜厚を高い精度で測定することができる。

【0024】他の発明

【構成】また、上述した課題を解決するために、請求項2の発明は、導体上の絶縁物表面における光の反射を利用して前記絶縁物表面までの距離を測定する光学式センサと、前記導体に発生する渦電流を利用して前記導体までの距離を測定する渦電流センサと、前記渦電流センサの温度を検出する温度センサと、前記渦電流センサを加熱するヒータと前記温度センサによって検出される前記渦電流センサの温度を前記ヒータによる加熱を行うことにより一定に維持する温度制御手段と、前記光学式センサによって測定される距離と前記渦電流センサとによって測定される距離との差から前記絶縁物の膜厚を算出する膜厚算出手段と、を備え、前記渦電流センサの温度を制御して温度ドリフトを防止しながら、前記絶縁物の膜厚測定を行うことを特徴とする。

【0025】請求項3の発明は、請求項2の発明におい

て、前記温度制御手段による前記渦電流センサの温度調整は、前記ヒータに対する通電を断続することにより行い、前記渦電流センサによる距離の測定は、前記ヒータに対する通電が中断したときに行うことを特徴とする。

【0026】請求項4の発明は、導体上の絶縁物表面における光の反射を利用して前記絶縁物表面までの距離を測定する光学式センサと、前記導体に発生する渦電流を利用して前記導体までの距離を測定する渦電流センサと、前記渦電流センサの温度を検出する温度センサと、前記渦電流センサを加熱するヒータと前記温度センサによって検出される前記渦電流センサの温度を、前記ヒータに交流電流を流して加熱することにより一定に維持する温度制御手段と、前記渦電流センサの出力に現れる前記ヒータの電流周波数成分を除去する周波数成分除去手段と、前記光学式センサによって測定される距離と、前記周波数成分除去手段によってヒータ電流の周波数成分が除去された前記渦電流センサの出力に基づいて測定される距離との差から前記絶縁物の膜厚を算出する膜厚算出手段と、を備え、前記渦電流センサの温度を制御することにより温度ドリフトを防止することを特徴とする。

【0027】請求項5の発明は、請求項2～4のいずれかにおいて、前記ヒータは、発熱用導体を1箇所あるいは複数箇所で折り返すことにより、あるいは偶数本の発熱用導体を組み合わせて用いることにより、隣接する前記発熱用導体を通電電流の向きが反対になるように配置して用いることを特徴とする。

【0028】上述した請求項2～5の各発明は、渦電流センサが使われる環境、特に周囲の僅かな温度変動が高精度測定に悪影響をもたらす支配的な要因であることに着目し、これらの点を改善したものである。

【0029】そもそも渦電流センサは、内蔵されたコイルに高周波電流を与え、導電体との距離に応じた磁界及び電界の変化をコイルのインダクタンスの変化として検出するものであって電磁気的に非常に敏感なものである。従って、渦電流センサ近傍にヒータを配置するといった電磁気的に影響を与えることは好ましくないとされていた。ところが、温度変動による悪影響を防止して高精度化を実現するには、渦電流センサに対して積極的に温度制御を施さなければならず、しかも、渦電流センサ本来の動作や機能を保たなければならぬという相反する要求を満たす必要があった。このために種々の実験・検討を行った結果、いくつかの手法により上記相反する要求を満たすことができることが判明した。

【0030】一つの方法は、渦電流センサ（例えば渦電流センサ内の測定プローブ部のみ、あるいは測定プローブ部とこの測定プローブ部の出力電圧を増幅するアンプ部の両方）にヒータを配置し、ヒータ電流をオンオフすることにより、渦電流センサを常温よりも高い一定温度に保つようとする。そして、ヒータ電流オフ時を捕らえて測定信号の取り込みを行う方法である。

【0031】他の方法は、同様に渦電流センサにヒータを配置し、ヒータ電流としてある一定の周波数の交流電流を流す。この交流電流の振幅を制御することにより、渦電流センサを常温よりも高い一定温度に保つようになる。そして、渦電流センサの処理回路部にヒータ電流の周波数成分を除去する回路を付加する方法である。しかし、この手法においてヒータ電流振幅の急激な変調を行う場合には、ヒータ電流に含まれる周波数帯域が広くなることを考慮し、渦電流センサのプローブ部に付加される高周波電界の帯域が干渉しないように、ヒータ電流の周波数を設定する必要がある。

【0032】さらに他の方法は、ヒータ線（発熱用導体）折り返すことにより通電電流の向きが反対となるようにヒータを配置し、あるいは通電電流の向きが反対となるように偶数本のヒータ線を対にして配置することにより、ヒータ電流によって生じる磁界を軽減する方法である。この方法は、上述した2つの方法と併用しても良い。

【0033】また、渦電流センサの測定プローブにヒータ線を巻く場合、ヒータ線は導電体であるために、密に巻きすぎると渦電流センサの感度を低下するので注意が必要である。

【作用】請求項2～5の発明は以上の構成からなり、次に、その作用を説明する。

【0034】請求項2の非接触式膜厚測定器では、渦電流センサの温度を検出するために温度センサが設けられており、温度制御手段によってこの検出した温度を監視する。そして、渦電流センサが所定の設定温度より低い場合には渦電流センサに装着されているヒータに通電し、設定温度に達したら通電を停止することにより、渦電流センサが一定温度に制御される。

【0035】このようにして一定温度に制御された渦電流センサにより、例えば測定プローブ内のコイルのインダクタンスを検出して導体までの距離を測定する。このコイルのインダクタンスは、導体までの距離が一定でも温度が変化するとコイル形状が変化してしまう。従って、本発明では渦電流センサを一定温度に制御しながら検出信号の取り込みを行っている。

【0036】請求項3の非接触式膜厚測定器では、上述した請求項2の温度制御手段による温度調整をヒータに対する通電を断続することにより行っており、ヒータに対する通電を中断したときのタイミングで渦電流センサによる検出動作を行っている。上述したように、測定プローブ内のコイルのインダクタンスは、導体までの距離が一定でも温度が変化するとコイル形状が変化してしまうが、導体までの距離と温度が一定でもヒータへの通電による電磁障害を受けた場合には変化してしまう。従って、本発明では渦電流センサを一定温度に制御するとともに、ヒータへの通電を中断したタイミングで検出信号の取り込みを行っている。

【0037】請求項4の非接触式膜厚測定器では、渦電流センサに装着されているヒータに交流電流を流すことにより加熱を行っており、温度制御手段は、この交流電流の振幅（すなわちヒータに印加する交流電圧の振幅）を現在の渦電流センサの温度と設定温度との差に応じて制御することにより、渦電流センサが一定温度に制御されるようになっている。

【0038】本発明では、このようにヒータ電流として振幅変調したある一定の周波数の交流電流を流しているため、渦電流センサの検出出力にも同じ周波数成分が現れ、この周波数成分を周波数成分除去手段によって除去することにより、電磁障害のない良好な検出結果を得ている。

【0039】但し、ヒータ電流に含まれる周波数帯域が、渦電流センサプローブに付加している高周波電圧の帯域と干渉した場合には、ヒータ電流に含まれる周波数成分のみを良好に除去できないため、このような干渉が生じないようにヒータの通電電流の周波数を決定する必要がある。

【0040】請求項5の非接触式膜厚測定器では、上述したヒータの発熱用導体を折り返すことにより、あるいは偶数本を対にして組み合わせて用いることにより、隣接する発熱用導体の通電の向きが反対になる。従って、電流値が同じ強度で逆向きの2本の発熱用導体を束ねることにより、お互いが発生する磁界が打ち消し合う。

【発明の効果】以上説明したように、請求項2～5の発明によれば、ヒータで加熱することにより渦電流センサを一定温度に保っており、温度ドリフトを防止することにより、正確に導体までの距離を測定することができる。

【0041】また、ヒータ加熱を中断した際に測定を行うことにより、あるいは、ヒータ通電電流により現れる周波数成分を後に除去することにより、あるいは、ヒータの発熱用導体同士を互いに発生する磁界を打ち消すように配置することにより、ヒータ通電による電磁障害を防止して、正確に導体までの距離を測定することができる。

【0042】この結果、正確な導体までの距離に基づいて、絶縁物の膜厚を高い精度で測定することができる。

【0043】

【実施例】以下、図面に基づいて本発明の一実施例について詳細に説明する。

【0044】図1は、本発明を適用した一実施例の非接触式膜厚測定器の全体構成を示す図である。

【0045】本実施例は、光学式センサの投光部に半導体レーザ（LD）と光ファイバとを有し、渦電流センサおよびアンプにヒータを配してアクティブな温度制御を行うことにより、非接触・非破壊型の高精度測定を可能にしたことに特徴がある。

【0046】図1に示す本実施例の非接触式膜厚測定器

は、基体100上に被覆された被膜110の膜厚を高精度に測定するものである。基体100は導体により形成されており、被膜110は絶縁体により形成されている。

【0047】この非接触式膜厚測定器は、プローブケース10内に収納固定された渦電流センサプローブ12及び光学式センサプローブ14と、これらの各プローブから出力される検出信号に基づいて基体100までの距離Da及び被膜110までの距離Dbを算出するとともに被膜110の膜厚Dを算出する信号処理部16と、信号処理部16による算出結果を表示する表示部18とを含んで構成されている。

【0048】上述した信号処理部16は、渦電流センサプローブ12から出力される検出信号Saを増幅するアンプ20を含んでおり、このアンプ20と渦電流センサプローブ12とが室温より高い一定温度に制御されるようになっている。

【0049】この温度制御を行うために、ヒータ及び温度センサを含む2つの温度制御装置22, 24が設けられており、一方の温度制御装置22が渦電流センサプローブ12を覆うように配置され、他方の温度制御装置24がアンプ20を覆うように配置されている。

【0050】光学式センサプローブ14は、三角測量の原理を用いることにより被膜110までの距離を測定するためのものであり、正反射構造を有する投光部26と受光部28とを含んでいる。

【0051】一般に、表面反射光と内部拡散光の光強度を比べると、表面反射光の方が圧倒的に大きい。例えば、自動車の外板塗装のように光沢を有する塗膜面では、内部拡散光より表面反射光の方が40dBも大きくなる。それに加え、正反射光強度は被膜の色にほとんど左右されないため、正反射構成の光学式センサでは、被膜の色による補正や調整を必要とせずに正確に表面の位置を測定することができる利点があり、このため本実施例の光学式センサプローブ14も正反射構成としたものである。なお、この光学式センサプローブ14の詳細な構成については後述する。

【0052】本実施例の非接触式膜厚測定器はこのような構成を有しており、上述したプローブケース10を基体100及び被膜110に向け隔離的に対向配置することにより、渦電流センサプローブ12を用いて基体100の表面までの距離Daが測定される。また、光学式センサプローブ14を用いて被膜110の表面までの距離Dbが測定される。両センサプローブ12, 14から出力される各測定信号Sa及びSbは、ともに信号処理部16へ向け出力される。

【0053】信号処理部16は、各プローブ12, 14から入力される信号SaおよびSbに基づいて上述した2つの距離Da, Dbを演算し、さらにこれらの値に基づいて被膜110の膜厚Dを演算し、その演算結果を測

定信号Sdとして外部及び表示部18に向け出力する。このように、外部に信号Sdを出力することにより、この測定信号Sdに基づいて塗装ラインの自動制御を行ったり、その他各種用途に広く用いることが可能になる。

【0054】表示部18は、信号処理部16から入力される測定信号Sdに基づき、被膜110の膜厚測定結果を表示する。また、信号処理部16において膜厚の測定値が要求される許容範囲に入っているか否かを判断するようすれば、表示部18からこの許容範囲内にあるか否かを同時に表示することも可能であり、許容範囲を外れた場合の対策を即座に行うことでもできる。

【0055】図2は、上述した光学式センサプローブ14の詳細な構成を示す図である。同図に示すように、光学式センサプローブ14は、投光部26と受光部28とを正反射構造に配置して形成されている。

【0056】また、図3は本実施例の投光系の概略を示す図であり、図4は一般的な光学式三角測量を行う従来の投光系を示す図である。

【0057】本実施例の投光部26は、光源となるレーザダイオード(LD)30と、光を伝搬する光ファイバ34と、光ファイバ34の入射端及び出射端に設けられる2つのレンズ32, 36とを含んで構成される。

【0058】図3に概略を示した本実施例の投光系においては、LD30から照射される光は、レンズ32によって集光され、光ファイバ34に導かれる。このようにして光ファイバ34に入射された光は光ファイバ34内を伝搬し、出射光が光ファイバ32の出射端に配置されたレンズ36によって平行光線となる。

【0059】図3に示した投光系では、LD30の出射光の中心位置変動は、光ファイバ34の入射端でのスポット変動となるが、レンズによる結像系の倍率を等倍程度にしておけば、光ファイバ34への結合効率にもほとんど影響を与えない。

【0060】また、光ファイバ34内を伝搬する光波は、光ファイバ34の固有モード群の重ね合わせとして伝搬する。固有モード群に一致しない光波成分は、光ファイバ34を伝搬することができず、途中で光ファイバ34の外に放射される。この固有モード群に一致しない導波モードを一般に漏れモードと呼ぶ。ほとんどの漏れ

モードが光ファイバ34の外へ放射されるには、ある程度光ファイバ34を長くする必要がある。例えば、光ファイバ34の構造等によって異なるが、一般に、数100mm程度の長さがあれば充分である。また、各固有モードの光波については、光ファイバ34の長手方向に垂直な成分の光強度分布は、光ファイバの長手方向位置にようず一定となる。

【0061】図5は、3種類の固有モードを例にとり、上述した垂直方向成分の強度分布を示す図である。同図に示すように、光ファイバ34中を伝搬する光波の導波モードの強度分布は中心対称であり、重心位置はどれも

光ファイバの中心〇に一致する。従って、固有モードの異なる複数種類の光波の重ね合わせで表される光波の光強度重心位置も常に光ファイバ中心に位置する。すなわち、光ファイバ34の出射端における光強度重心位置は光ファイバ34の中心に位置し変動しない。その結果、測定対象物120上の照射スポット位置中心は、LD出射中心位置の変動に全く影響されず、安定したものとなる。

【0062】しかし、光ファイバ34として複数の固有モードを有するマルチモード光ファイバを用いると、入射時に結合される各固有モードのパワーの比率が変化したり、外乱等により光ファイバ内で固有モード間の変換が生じる。その結果、光ファイバの出射端において、光強度重心位置は変化しなくとも、光強度分布自体が変化してしまう。実際に図2に示す受光部28によって反射光を検出する際には、光スポットの重心位置を求めるため、光強度分布の変動は原理的には出力に影響を与えない。但し、位置検出器としてPSD(Position Sensitive Device)を用いた場合には、PSDの有する非線形性などによって誤差を生じることが考えられるため、この場合にはマルチモード光ファイバの使用は好ましくない。

【0063】一方、光ファイバとして固有モードを1つしか有しないシングルモード光ファイバを用いた場合には、光ファイバの出射端の光強度分布は、重心位置だけでなくそのプロファイル(輪郭形状)も一定に保たれることから、PSDの非線形性にも影響されずに正しい出力が得られる。従って、本実施例で用いる光ファイバ34は、特にシングルモード光ファイバとすることが好ましい。

【0064】また、光ファイバ34の出射端に設けられたレンズ36は、光ファイバ34の出射端に接して配置可能なセルフォックレンズを使用するのが便利であり、しかもこのように出射端に接して配置した場合には出射端近傍での光の漏れが少なく集光効率も良い。

【0065】ところで、図4に示す従来の投光系においては、LD30の出射光はレンズ31により、平行光線となるか、あるいは測定対象物120上の測定範囲の中心位置で集光されるようになっている。一般に、LD出射光は大きな広がり角を有するため、LD30とレンズ31との距離l<sub>a</sub>は数mm以下に近接して置かれる。それに対し、レンズ31と測定対象物120の距離l<sub>b</sub>は大きいため、拡大光学系になっているのが普通である。一般にLD30の出射開口の大きさは、厚さが1μm以下、幅が数μmであり、LD出射光の中心位置は数nm程度は変動している。例えば、LD30とレンズ31との距離l<sub>a</sub>が1mmで、レンズ31と測定対象物120の距離l<sub>b</sub>が50mmであった場合には、LD出射光の中心位置が数nm程度変動することにより、測定対象物上では0.1μmのスポット変動となって現れる。従つ

て、図4のような従来の投光系ではサブμmの高分解能測定を達成することは困難であった。

【0066】また、図2に示した本実施例の受光部28は、被膜110からの反射光を全反射するミラー38と、このミラー38によって全反射された光を集光するレンズ40と、フィルタ42と、結像の位置を検出する位置検出器44とを含んで構成される。

【0067】この受光部28は、上述した投光部26からの正反射光を受光するように配置されている。被膜110から入射される反射光は、ミラー38によって所定の方向に向け全反射され、レンズ40及びフィルタ42を通過した後位置検出器44上に投射される。被膜110と位置検出器44とは、レンズ40を挟んで結像位置に配置してある。従って、被膜110の測定対象面が傾いていても、その正反射光がレンズ40の開口内にある限り位置検出器44上のスポット位置(結像位置)は変動しないため、被膜110の測定対象面の傾きに影響されずに、正確な表面位置の測定が可能となる。

【0068】位置検出器44上に形成される結像位置と被膜110の反射位置、すなわち被膜110までの距離とは1対1に対応しており、位置検出器44による検出結果は、光学式センサプローブ14の出力信号Sbとして信号処理部16に入力され、信号処理部16において光学式センサプローブ14の先端から被膜110の表面までの距離D<sub>b</sub>が算出される。

【0069】また、位置検出器44とレンズ40との間に波長選択用のフィルタ42を介在させることにより、LD30から照射される光の波長成分のみを選択的に透過させることができる。これにより、光源であるLD30の出力が比較的小さくても、外乱光の影響を受けずに精度の高い測定を行うことが可能となる。

【0070】図6は、温度ドリフトの影響を除去するために渦電流センサプローブ12を覆うように設けられた温度制御装置22の詳細構成を示す図である。

【0071】同図に示す温度制御装置22は、渦電流センサプローブ12を加熱するヒータ46と、渦電流センサプローブ12の温度を検出する温度センサ48と、ヒータ46に通電を行う直流電源50と、ヒータ46に対する通電をオンオフするリレー52と、渦電流センサプローブ12の温度を一定に保つための制御を行う温度調整器54とを含んで構成されている。

【0072】温度調整器54は、渦電流センサプローブ12の温度を温度センサ48で監視している。渦電流センサプローブ12の温度が設定温度より低い場合には、リレー52内のリレーコイルに通電することによりリレー接点をオン状態にしてヒータ46に通電を行う。そして、設定温度に達した場合には、ヒータ46に対する通電を停止する。このようにして、渦電流センサプローブ12が一定温度に制御される。

【0073】また、上述したリレー52からは、あるいは

は温度調整器54からはレリー52内のリレー接点のオンオフ状態を示すオンオフ信号Skを出力しており、このオンオフ信号Skを渦電流センサプローブ12の出力Saとともに上述した信号処理部16に送っている。

【0074】信号処理部16は、入力されるオンオフ信号Skに基づいてリレー52のリレー接点がオン状態からオフ状態に変わる時点、すなわちヒータ46に対する通電が中断したタイミングを判断し、その後渦電流センサプローブ12の出力Saを取り込んでアンプ20による増幅を行う。これにより、ヒータ電流が流れていないときに信号Saを取り込むことになるため、渦電流センサプローブ12によって測定される基体100までの距離は、ヒータ電流による電磁障害を受けることはなく、高精度に測定することができる。

【0075】また、信号処理部16内のアンプ20を一定温度に制御するために設けられた温度制御装置24も上述した温度制御装置22と同じ構成を有しており、アンプ20を一定温度に保っている。但し、アンプ20の動作が周辺の電磁場により影響を受けず、温度を一定に保つことにより常に安定した動作が行われる場合には、ヒータに対する通電を中断したタイミングで動作させる必要はない。

【0076】なお、渦電流センサプローブ12を冷却して室温より低い一定温度に保った場合にも温度ドリフトの発生を防止することができる。しかし、この場合にはプローブケース10等の結露を防止するための手段を講じる必要がある。

【0077】図7は、渦電流センサプローブ12を覆うように設けられた温度制御装置22の他の例を示す図である。

【0078】同図に示す温度制御装置22は、ヒータ46と温度センサ48の他、ヒータ46に所定の交流電流を通電する交流電源56と、特定の周波数帯域の信号のみを除去するためのフィルタ回路58と、渦電流センサプローブ12の温度を一定に保つための制御を行う温度調整器60とを含んで構成されている。

【0079】温度調整器60は、渦電流センサプローブ12の温度を温度センサ48で監視している。そして、渦電流センサプローブ12の温度が設定温度より低い場合にはヒータ46に流す交流電流の振幅を大きく、設定温度に達した場合にはヒータ46に流す交流電流の振幅を小さく制御することにより、渦電流センサプローブ12が一定温度に制御される。

【0080】このように、ヒータ電流として一定周波数の交流電流を流すと、渦電流センサプローブ12内のコイルのインダクタンスが変化し、渦電流センサプローブ12の出力Saにはヒータ電流と同じ周波数成分が現れる。フィルタ回路58は、渦電流センサプローブ12の出力からこの周波数成分のみを除去するためのものであり、フィルタ回路58を介した信号Saが信号処理部1

6内のアンプ20に入力される。

【0081】なお、信号処理部16内のアンプ20を一定温度に制御するために設けられた温度制御装置24も図7に示した温度制御装置22と同じ構成とすることができます。但し、アンプ20の動作が周辺の電磁場により影響を受けず、温度を一定に保つことにより常に安定した動作が行われる場合には、フィルタ58を省略することができる。また、温度制御装置24のみを図6に示す構成とすることもできる。

10 【0082】図8は、渦電流センサプローブ12に装着するヒータの配置を工夫することにより、渦電流センサプローブ12に及ぼす電磁障害を軽減する場合の構成を示す図である。同図に示す構成は、図6あるいは図7に示す構成とともに用いることができる他、単独で用いることができる。

【0083】図8に示すヒータ46は、1本の発熱用導体64を渦電流センサプローブ12の外周に巻き込むことにより形成されている。具体的には、1本の発熱用導体64を中央部Aで折り返し、この折り返された2本の発熱用導体64を一対にして渦電流センサプローブ12に巻き付けてある。このように発熱用導体64を巻き付けることにより、ヒータ46に流れる電流が図8に示す矢印方向に流れるため、隣接する発熱用導体64によって生じる磁界が互いに打ち消し合う。従って、渦電流センサプローブ12の出力Saに対する電磁障害を軽減することができる。

20 【0084】このように、本実施例の非接触式膜厚測定器は、投光部26に光ファイバ34を用いており、これにより被膜110上に生じる照射スポットの中心は、LD出射中心位置の変動に全く影響されず、安定したものとなる。従って、光学式センサプローブ14の出力に基づいて信号処理部16によって算出される被膜110までの距離Dbも誤差の少ない精度の高いものとなる。

【0085】また、上述した光ファイバ34をシングルモード光ファイバとすることにより、光ファイバ34の出射端の光強度分布を重心位置だけでなくその輪郭形状も一定に保つことができることから、光ファイバ34からの出射光をさらに安定させることができ、さらに高い測定精度を実現することができる。

40 【0086】また、光学式センサプローブ14の投光部26に光ファイバ34を用いることにより、その可とう性から測定装置の光源であるLD30の配置に自由度を持たせることができるために、例えばプローブケース10の小型化や非接触式膜厚測定器の設計が容易になるといった効果もある。

【0087】また、本実施例の非接触式膜厚測定器は、渦電流センサプローブ12に対する電磁障害をなくすために以下の方法を用いている。

【0088】(1) ヒータ46に直流電流を流すことにより渦電流センサプローブ12の温度を一定に保つとともに

に、ヒータ46に対する通電を中断した後に基体100までの距離を測定する。

【0089】(2) ヒータ46に一定周波数の交流電流を流し、この交流電流の振幅を可変に制御することにより渦電流センサプローブ12の温度を一定に保つとともに、渦電流センサプローブ12の出力信号からヒータ電流の周波数成分のみを除去した信号に基づいて基体100までの距離を測定する。

【0090】(3) ヒータ46を形成する発熱用導体64を折り返すことにより、隣接する発熱用導体64に流れる電流の向きを反対にし、発生する磁界が互いに打ち消し合うようにする。

【0091】これらの方法により渦電流センサプローブ12の温度を一定に保つとともに、ヒータ46の通電電流により生じる電磁障害をなくすことができ、渦電流センサプローブ12の出力に基づいて信号処理部16によって算出される基体100までの距離Daも誤差の少ない精度の高いものとなる。

【0092】このように本実施例によれば、基体100及び被膜110までの距離Da, Dbを高い精度で測定することができ、これらに基づいて算出される被膜110の膜厚Dの値も高い精度で求めることができる。

【0093】次に、本実施例の非接触式膜厚測定器を用いて、自動車鋼板の平板サンプル上の塗装膜厚測定を実際に行った結果の一例を説明する。

【0094】図9は、塗装被膜測定装置の構成を示す図である。

【0095】同図に示す塗装被膜測定装置は、図1に示した本実施例の非接触式膜厚測定器にZ軸ステージ70とコンピュータ72とを加えて構成されており、温度制御装置22としては図6に示した構成を有する場合が示されている。

【0096】Z軸ステージ70は、図1に示したプローブケース10を垂直方向に移動させるものであり、下端近傍に取り付け固定された塗板130とプローブケース10内の渦電流センサプローブ12及び光学式センサプローブ14の各先端との距離を固定する。また、この固定された距離はコンピュータ72からの指示により任意に変えることができる。

【0097】コンピュータ72は、信号処理部16に接続されており、Z軸ステージ70に取り付けられたプローブケース10を垂直方向に移動させる指示を行うとともに、塗装被膜の膜厚計算を行う。なお、信号処理部16において膜厚計算まで行う場合には、このコンピュータ72によってプローブケース10の垂直位置のみを制御すればよい。

【0098】図9に示した塗装被膜測定装置において、光学式センサプローブ14は図2に示した構成を有している。そして、LD30のLD発振波長は830nmで、出力は2mWとする。また、光ファイバ34はコア

径が $\phi 6\mu\text{m}$ 、クラッド径が $\phi 125\mu\text{m}$ 、長さが1mのシングルモードファイバを用い、ファイバ出射端にセルフォックレンズ36を配置した。実際に塗板130上での照射スポットサイズを測定したところ約 $0.2\text{mm}$ であった。また、受光部28の結像倍率は約3倍である。

【0099】なお、この光学式センサプローブ14による測定範囲は $7.5\pm 0.5\text{mm}$ であり、光学式センサプローブ14の先端から塗板130の導体表面までの距離がこの範囲にある場合に限り高分解能測定が可能となる。

【0100】また、渦電流センサプローブ12は、図6に構成を示した温度制御装置22により一定温度 $40\pm 0.1^\circ\text{C}$ に保たれている。 $40^\circ\text{C}$ 付近での温度ドリフトを測定したところ最大 $0.24\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ であったことから、温度制御下における渦電流センサプローブ12の温度ドリフトは $0.024\mu\text{m}$ 以下であり、測定結果に全く影響しない。

【0101】なお、この渦電流センサプローブ12による測定範囲は、低分解能測定の場合は $0\sim 10\text{mm}$ であり、高分解能測定の場合は $7.5\pm 0.5\text{mm}$ である。

【0102】信号処理部16は、渦電流センサプローブ14の出力に基づいて塗板130表面までの距離を求め、低分解能出力Dcと高分解能出力Daをコンピュータ72に向け出力する。実際には、渦電流センサプローブ12の出力信号をカットオフ周波数 $10\text{Hz}$ のフィルタを通してS/N比を上げることにより、高分解能出力Daを得ている。また、信号処理部16は、光学式センサプローブ12の出力に基づいて塗板130の鋼板表面までの距離を求め、高分解能出力Dbをコンピュータ72に向け出力する。

【0103】測定は次のようにして行った。

【0104】まず、渦電流センサプローブ12の出力を信号処理部16で処理した低分解能出力Scをコンピュータ72でモニタしながら、渦電流センサプローブ12及び光学式センサプローブ14の高分解能測定範囲 $(7.5\pm 0.5\text{mm})$ までZ軸ステージ70を駆動し、プローブケース10を移動させる。

【0105】プローブケース10を高分解能測定範囲に移動したら、Z軸ステージ70を固定し測定を開始する。図6に示した温度制御装置22のリレー52の立ち下がり信号Skをトリガ信号にして、信号処理部16は、渦電流センサプローブ12の出力に基づく高分解能出力Daと光学式センサプローブ14の出力に基づく高分解能出力Dbと求める。コンピュータ72は、これら2つの高分解能出力Da, Dbを同時に取り込み、所定の演算処理を行って膜厚Dを求め、内蔵されたディスプレイ上に表示する。

【0106】以下、コンピュータ内の演算処理について付け加える。 $\mu\text{m}$ オーダーの高精度測定のためには、渦

17

電流センサプローブ12を用いた測定原理による距離と出力の非線形性と、光学式センサプローブ14内のレンズの収差や位置検出器44による距離と出力の非線形性は無視できない。そのため、予め求めておいた校正曲線と両センサプローブの出力から、塗板130の下地鋼板までの距離D<sub>a</sub>と塗膜表面までの距離D<sub>b</sub>を換算した。

【0107】較正曲線の測定は、塗膜のない鋼板あるいは膜厚の既知である塗板を対象にして、コンピュータ72でZ軸ステージ70を制御し、プローブケース10と塗板との距離を一定間隔づつ変えていって、2つの高分解能出力D<sub>a</sub>、D<sub>b</sub>を測定することにより行った。この測定結果に基づいて、測定点以外を補間することにより校正曲線の全体を求めることができる。

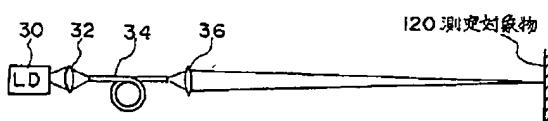
【0108】このように、容易に較正曲線を測定できることは望ましいことである。渦電流センサプローブ12の出力は、塗板130の厚さや曲率、材質によって左右される。従って、より正確な測定を行うには、予め、塗料を塗布する前の下地鋼板を用いて較正曲線を算出しておき、塗料を塗布後に膜厚を測定することが望ましい。こうすることにより、鋼板の厚さや曲率、材質の違いによる影響を補正し、真に正確な膜厚を測定することができる。

【0109】また、複数層の塗膜が重ね塗りされる場合において、その内の1層の膜厚を測定することも可能である。例えば、2層の塗膜の上の層の膜厚を測定したい場合には、1層目を塗布した塗板を用いて較正曲線を算出し、2層目塗布後に膜厚を測定すれば、正確に2層目の膜厚のみを測定することができる。

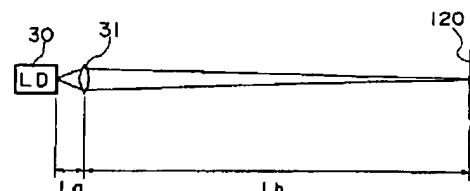
【0110】なお、本発明は上述した実施例に限定されるものではなく、本発明の要旨の範囲内で種々の変形実施が可能である。

【0111】例えば、上述した実施例においては、基体100上に形成された1層の被膜110の膜厚を測定する場合、あるいは校正曲線を用いることにより複数層の内の1層の膜厚のみを測定する場合を説明したが、基体100上に積層された複数層の絶縁被膜の各膜厚を測定することもできる。この場合には、それぞれの層が積層

【図3】



【図4】



された直後に膜厚を測定し、それぞれの測定結果を減算することにより各層の膜厚を求めることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明を適用した一実施例の非接触式膜厚測定器の全体構成を示す図である。

【図2】光学式センサプローブの詳細な構成を示す図である。

【図3】本実施例の投光系の概略を示す図である。

【図4】一般的な光学式三角測量を行う従来の投光系を示す図である。

【図5】光ファイバ内の3種類の固有モードの強度分布を示す図である。

【図6】温度ドリフトの影響を除去するために渦電流センサプローブを覆うように設けられた温度制御装置の詳細構成を示す図である。

【図7】温度制御装置の他の例を示す図である。

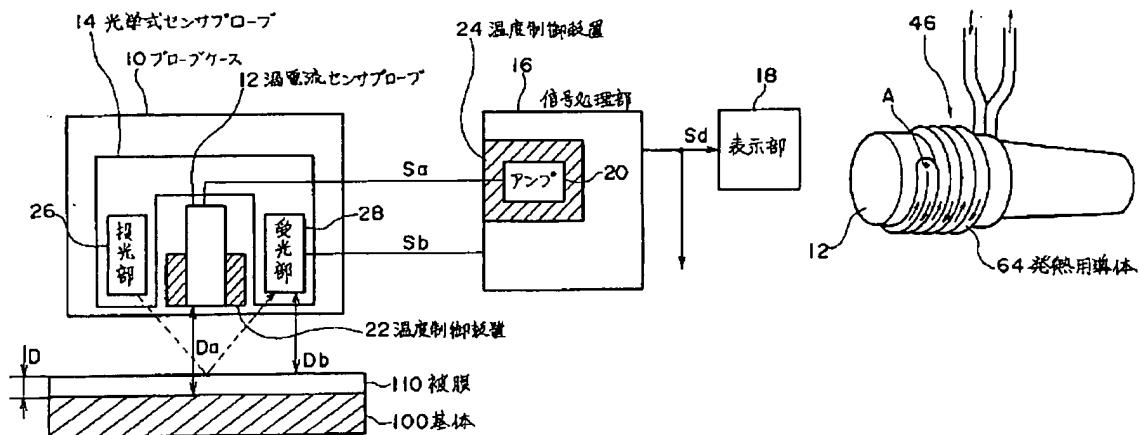
【図8】渦電流センサプローブに装着するヒータの配置を工夫することにより電磁障害を軽減する場合の構成を示す図である。

【図9】本実施例の非接触式膜厚測定器が適用される塗装被膜測定装置の構成を示す図である。

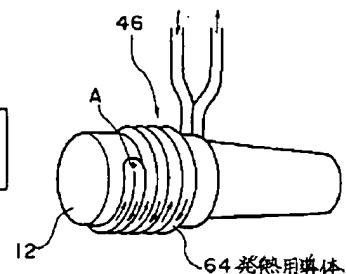
【符号の説明】

- 10 プローブケース
- 12 渦電流センサプローブ
- 14 光学式センサプローブ
- 16 信号処理部
- 22, 24 温度制御装置
- 26 投光部
- 28 受光部
- 30 レーザダイオード (LD)
- 34 光ファイバ
- 44 位置検出器
- 46 ヒータ
- 48 温度センサ
- 54 温度調整器
- 58 フィルタ回路

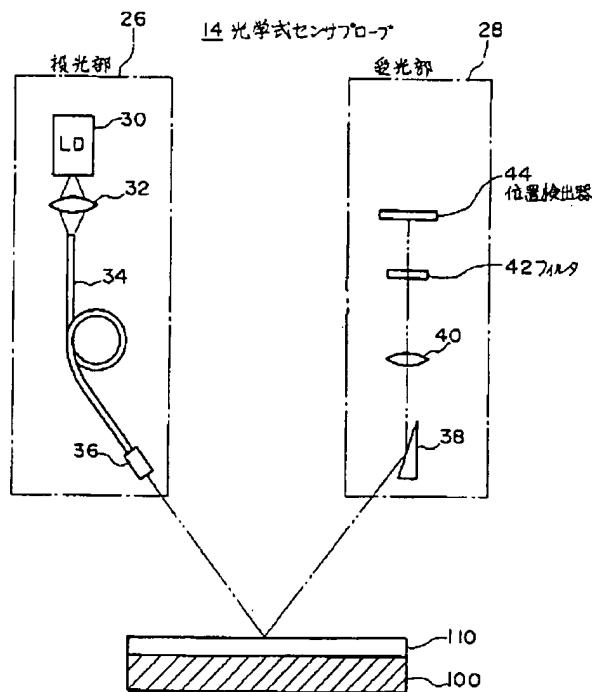
【図1】



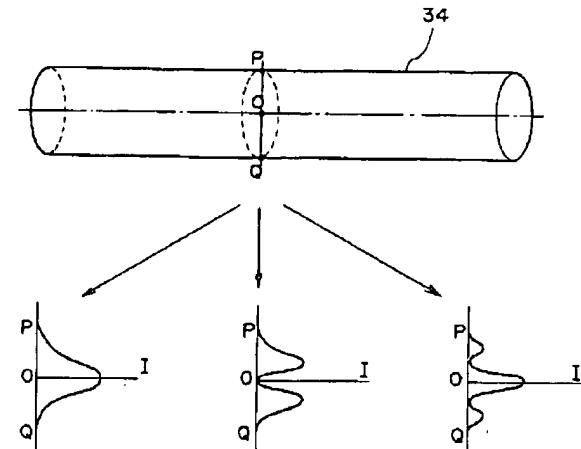
【図8】



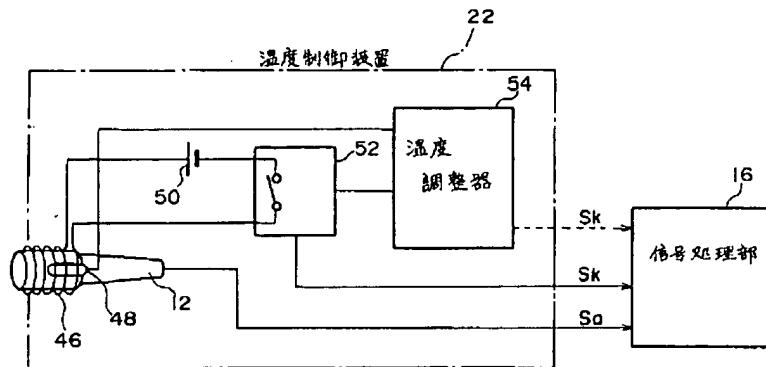
【図2】



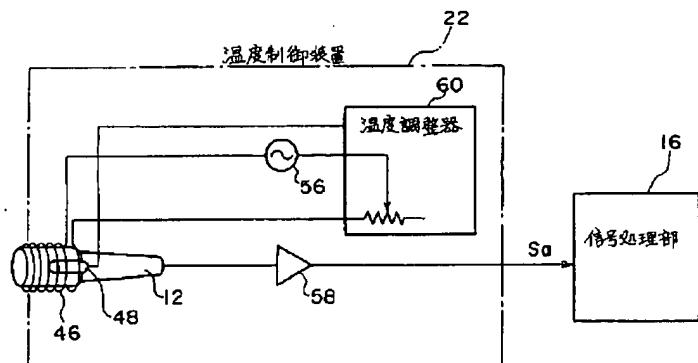
【図5】



【図6】



【図7】



【図9】

